

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบทองแดงเชิงซ้อนโดยใช้
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์



นายจิตตกานต์ สีนุเสถก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544
ISBN 974-03-1280-2
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF COPPER COMPLEX REMOVAL EFFICIENCY
USING ION EXCHANGE RESIN AND IRON OXIDE – COATED SAND

Mr. Jittakarn Sintusek

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkom University

Academic Year 2001


ISBN 974-03-1280-2


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบทองแดงเชิงซ้อนโดยใช้
เรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์
โดย นายจิตตกานต์ สีนุเสถ
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์

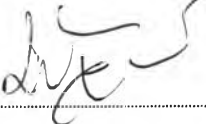
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

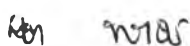

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โล่ห้วงศ์วัฒน์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

จิตตกานต์ สีนุเสถ : การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสารประกอบทองแดงเชิงซ้อนโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ (A STUDY OF COPPER COMPLEX REMOVAL EFFICIENCY USING ION EXCHANGE RESIN AND IRON OXIDE – COATED SAND) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 235หน้า. ISBN 974-03-1280-2.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้าโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ น้ำเสียจากการชุบโลหะทางเคมีที่มีทองแดงเชิงซ้อนความเข้มข้น 20 มก.ทองแดง/ล. และน้ำเสียจากการชุบโลหะทางไฟฟ้าที่มีทองแดงความเข้มข้น 20 มก./ล. การทดลองแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ 1) การทดลองเบื้องต้นแบบแบตช์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดทองแดงและทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนและทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 2) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดและนำกลับทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน 3) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดและนำกลับทองแดงในน้ำเสียโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยการศึกษาในขั้นตอนที่ 2) และ 3) เป็นการทดลองแบบคอลัมน์ที่บรรจุตัวกลาง 153 มล. โดยแปรค่าอัตราไหล ค่าพีเอช ความเข้มข้นของสารรีเจนเนอแรนท์ และอัตราการรีเจนเนอแรชั่น

ผลการทดลองเบื้องต้นแบบแบตช์พบว่าเรซินเหมาะสมที่จะใช้กำจัดทองแดงเชิงซ้อนในขณะที่ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ไม่เหมาะสมที่จะใช้กำจัดทองแดงเชิงซ้อนแต่เหมาะสำหรับกำจัดทองแดง จากผลการทดลองศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดและนำกลับทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบคอลัมน์พบว่ากำจัดทองแดงเชิงซ้อนความเข้มข้น 20 มก.ทองแดง/ล. ค่าพีเอชเท่ากับ 10 และอัตราไหล 20 BV/hr โดยใช้เรซิน 153 มล. จะสามารถบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ 288 BV เมื่อรีเจนเนอแรชั่นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราการรีเจนเนอแรชั่น 4.5 BV/hr เป็นเวลา 1 ชม. สามารถนำกลับทองแดงได้ประมาณร้อยละ 95.71 ส่วนการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดและนำกลับทองแดงในน้ำเสียโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงความเข้มข้น 20 มก./ล. คือที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 อัตราไหล 2 BV/hr โดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ 153 มล. จะสามารถบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ 9.97 BV เมื่อรีเจนเนอแรชั่นด้วยกรดซัลฟิวริก 0.01 นอร์มัล อัตราการรีเจนเนอแรชั่น 4.5 BV/hr เป็นเวลา 30 นาที สามารถนำกลับทองแดงได้ประมาณร้อยละ 50 โดยปราศจากเหล็กปนเปื้อน

การดำเนินงานบำบัดและนำกลับทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสีย 1 ลบ.ม. ต่อบรรยากาศทำงานด้วยเรซินพบว่าได้ผลตอบแทนประมาณ 1119 บาท/ปี ส่วนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์พบว่าค่าใช้จ่ายในการเตรียมยังสูงจึงไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริง

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต จิตตกานต์ สีนุเสถ

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2544

4270247521: MAJOR Environmental Engineering

KEYWORD: Copper/ Copper Complex/ Printed Circuit Boards Wastewater/ Iron Oxide - Coated Sand/ Ion Exchange Resin

JITTAKARN SINTUSEK: A STUDY OF COPPER COMPLEX REMOVAL EFFICIENCY USING ION EXCHANGE RESIN AND IRON OXIDE – COATED SAND

THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.ORATHAI CHAVALPARIT.,M.Sc. 235pp. ISBN 974-03-1280-2

This research studies the optimal condition for removing and recovering of copper from electroless plating and electroplating using ion exchange resin and iron oxide coated sand (IOCS). The research is divided in to three steps, the first step is the preliminary study on batch experiments of removing copper and copper complex 20 mg Cu/L using resin and IOCS. The second step is the removal and recovery of copper complex using resin. The last step is the removal and recovery of copper using IOCS. The last three steps are column experiments that filled with media 153 mL. The service flow rate, pH, regenerant concentration and regeneration flow rate are varied in the last three steps.

The batch experiments show that resin is proper for copper complex removal. Conversely, IOCS is improper for copper complex removal but IOCS is appropriate for copper removal. The column experiments show that copper complex 20 mg Cu/L, pH 10, 288 BV with service flow rate 20 BV/hr can be removed by resin 153 mL. NaOH 6 %by weight is used for regeneration with flow rate 4.5 BV/hr for 1hr in order to recover copper about 95.71 %. IOCS 153 mL is used to remove copper 20 mg Cu/L, pH6, 9.97 BV with service flow rate 2 BV/hr. H₂SO₄ 0.01 N is used for regeneration with flow rate 4.5 BV/hr for 30 minutes in order to recover copper about 50 % without iron contamination.

The treatment for one cubic meter per cycle of copper complex removal and recovery by resin can return 1119 baht/year. The prepared cost of IOCS was high. Consequently the using of IOCS was improper.

Department Environmental Engineering

Student's signature

จิตรกานต์ สิงตุเสก

Field of study Environmental Engineering

Advisor's signature

Orathai Chavalparit

Academic Year 2001

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินการวิจัยของข้าพเจ้ามาโดยตลอด และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรพล สายพานิช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ชาวเธียร ที่กรุณาตรวจสอบและให้คำชี้แนะจนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย และโครงการทุนอุดหนุนวิจัยวิทยาศาสตร์ของชินโสภณ พนิชที่ให้ทุนอุดหนุนสำหรับเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณรัฐพล สுகนธรังสี และ บริษัทไบเออร์ไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เรซิน และข้อแนะนำอันเป็นประโยชน์สำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณครูปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณพิชิต จริยธรรมานุกูล ที่อยู่เป็นเพื่อนทำวิจัยช่วงกลางคืน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ ๆ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือมาตลอดเวลา

ขอขอบคุณ คุณอุษาพร เลิศวิกุล ที่ให้คำแนะนำและกำลังใจด้วยดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งให้กำลังใจและความหวังยามตลอดจนผู้วิจัยสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ท
คำจำกัดความและอักษรย่อ.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย.....	2
2.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
2.2 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
บทที่ 3 ทบทวนเอกสาร.....	3
3.1 แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า.....	3
3.1.1 แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า.....	3
3.1.2 ขั้นตอนการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า.....	3
3.1.3 แหล่งกำเนิดและคุณลักษณะของน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า.....	7
3.2 น้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงโดยใช้ไฟฟ้าและชุบทองแดงโดยวิธีทางเคมี.....	9
3.2.1 น้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงโดยใช้ไฟฟ้า.....	9
3.2.2 น้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงโดยวิธีทางเคมี.....	9
3.3 เคมีของทองแดง.....	9
3.4 เคมีของสารประกอบเชิงซ้อน.....	10
3.5 เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า.....	14
3.6 ไฮดรอลิกและไฮดรอลิก.....	15
3.6.1 การเกิดไฮดรอลิกและไฮดรอลิก.....	15
3.6.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อไฮดรอลิกและไฮดรอลิก.....	16
3.6.3 ไฮดรอลิกและไฮดรอลิกที่เคลือบบนเคลือบมินเนอรัล.....	17
3.6.4 ความสามารถในการละลายของเหล็ก.....	18

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.7 การดูดติดของสารอนินทรีย์บนผิวสัมผัสของของแข็งและของเหลว.....	19
3.7.1 ปฏิกิริยาการบนผิวสัมผัสของออกไซด์และน้ำ.....	19
3.7.2 ปฏิกิริยาบนผิว Hydroxylated.....	22
3.7.3 การแทนที่กลุ่มไฮดรอกซิลบนผิวโดยไอออนลบพิเศษบางชนิด.....	25
3.8 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน.....	25
3.8.1 หน้าที่ของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน.....	25
3.8.2 โครงสร้างของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	26
3.8.3 การจำแนกประเภทของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	27
3.8.4 เรซินจำเพาะ.....	29
3.8.5 คุณสมบัติโดยทั่วไปของเรซิน.....	31
3.8.6 วัฏจักรการทำงานของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน.....	37
3.8.7 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นปัจจัยการแลกเปลี่ยนของเรซิน.....	40
3.9 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	43
บทที่ 4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	52
4.1 การเตรียมตัวกลาง.....	55
4.1.1 การเตรียมตัวกลางเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	55
4.1.2 การเตรียมตัวกลางทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	55
4.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	55
4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	55
4.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	61
4.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	61
4.3.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเชิงซ้อน.....	61
4.3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	61
4.4 การดำเนินการทดลอง.....	62
4.4.1 การทดลองเบื้องต้น.....	62
4.4.2 การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาการกำจัดและนำกลับมาใช้ใหม่ ของทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียจากการชุบโลหะทางเคมีโดยใช้ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	66

สารบัญญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.3 การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาการกำจัดและนำกลับมาใช้ใหม่ ของทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสียจากการชุบโลหะทางเคมีด้วย ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	69
4.4.4 การทดลองส่วนที่3 การศึกษาการกำจัดและนำกลับมาใช้ใหม่ ของทองแดงในน้ำเสียจากการชุบโลหะทางไฟฟ้าด้วย ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	71
4.5 วิธีการวิเคราะห์.....	73
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	74
5.1 ผลการทดลองเบื้องต้น.....	74
5.1.1 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดทองแดงเชิงซ้อน จากการชุบโลหะทางเคมีโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	74
5.1.2 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดทองแดงเชิงซ้อน จากการชุบโลหะทางเคมีโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	74
5.1.3 ผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดทองแดงในน้ำเสีย ชุบโลหะทางไฟฟ้าโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	78
5.1.4 สรุปผลการทดลองเบื้องต้น.....	78
5.2 การศึกษาการกำจัดและนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดงเชิงซ้อนในน้ำเสีย จากการชุบโลหะทางเคมีโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	82
5.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนด้วย เรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	82
5.2.2 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรชั่นที่มีต่อ ประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงเชิงซ้อนจากเรซิน แลกเปลี่ยนไอออน.....	82
5.2.3 การศึกษาผลของอัตราการรีเจนเนอเรชั่นที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการนำกลับทองแดงเชิงซ้อนจากเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	92
5.3 การศึกษาการกำจัดและนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดงในน้ำเสียจาก การชุบโลหะทางไฟฟ้าด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	101

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.3.1 การศึกษาผลของอัตราไหลที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ทองแดงด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	101
5.3.2 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	104
5.3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรนท์ที่มีต่อ ประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงจากทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	109
5.3.4 การศึกษาผลของอัตราการรีเจนเนอเรชั่นที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการนำกลับทองแดงจากทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	114
5.4 การประมาณค่าใช้จ่าย.....	124
5.4.1 ค่าใช้จ่ายสารเคมีในการกำจัดและการนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดง เชิงซ้อนในน้ำเสียจากการชุบโลหะทางเคมีโดยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน....	124
5.4.2 ค่าใช้จ่ายสารเคมีในการกำจัดและการนำกลับมาใช้ใหม่ของทองแดง ในน้ำเสียจากการชุบโลหะทางไฟฟ้าโดยใช้ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	126
5.5 การประยุกต์ใช้ทางวิศวกรรม.....	130
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	132
บทที่ 7 ข้อเสนอแนะ.....	134
รายการอ้างอิง.....	135
ภาคผนวก.....	138
ภาคผนวก ก. การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรชั่นที่มีต่อ ประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงเชิงซ้อนจากเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	139
ภาคผนวก ข. การศึกษาผลของอัตราการรีเจนเนอเรชั่นที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการนำกลับทองแดงเชิงซ้อนจากเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	160
ภาคผนวก ค. การศึกษาผลของอัตราไหลที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ทองแดงด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	176
ภาคผนวก ง. การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	185
ภาคผนวก จ. การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารรีเจนเนอเรนท์ที่มีต่อ ประสิทธิภาพในการนำกลับทองแดงจากทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	194

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ฉ. การศึกษาผลของอัตราการรีเจนเนอเรชันที่มีต่อประสิทธิภาพใน การนำกลับทองแดงจากทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	210
ภาคผนวก ช. การคำนวณค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุลบทั้งหมด ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	226
ภาคผนวก ซ. ข้อมูลและคำแนะนำสำหรับเรซินต่างแก่ LEWATIT [®] MonoPlus M500.....	230
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	235

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า	4
ตารางที่ 3.2 ลักษณะของของเสียจากน้ำทิ้งขั้นตอนต่างๆในกระบวนการผลิต แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า.....	7
ตารางที่ 3.3 คุณลักษณะของน้ำทิ้งรวมจากกระบวนการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า.....	8
ตารางที่ 3.4 คีเลติงเอเจนท์ที่ใช้บ่อยในงานอุตสาหกรรมที่มีการเคลือบหรือชุบโลหะ โดยวิธีการทางเคมี.....	12
ตารางที่ 3.5 ความเข้มข้นของกลุ่มไฮดรอกซิลบนผิว.....	21
ตารางที่ 3.6 ค่าคงที่ของ Silicato Complex ที่ 25°C.....	23
ตารางที่ 3.7 แสดงลำดับความชอบในการแลกเปลี่ยนไอออนโลหะของคีเลติงเรซิน ที่มีหมู่ไอออนเป็นอิมิโนไดอะซิเตต.....	30
ตารางที่ 3.8 แสดงคีเลติงเรซินชนิดต่างๆและไอออนที่เรซินมีความจำเพาะ ในการแลกเปลี่ยนด้วย.....	31
ตารางที่ 3.9 ลำดับความชอบของเรซินแต่ละประเภท.....	34
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลรายละเอียดของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดต่างแ่.....	57
ตารางที่ 5.1 การทดลองการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน โดยไม่ปรับค่าพีเอช.....	75
ตารางที่ 5.2 การทดลองการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ปริมาณต่างๆ โดยไม่ปรับค่าพีเอช.....	76
ตารางที่ 5.3 การทดลองการกำจัดทองแดงเชิงซ้อนด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	77
ตารางที่ 5.4 การทดลองการกำจัดทองแดงด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ปริมาณต่างๆ โดยไม่ปรับค่าพีเอช.....	79
ตารางที่ 5.5 การทดลองการกำจัดทองแดงด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	80
ตารางที่ 5.6 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐานด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วย NaOH ความเข้มข้นต่างๆ.....	87
ตารางที่ 5.7 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐานด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ.....	94

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 5.8 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐานด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วย อัตราไหลต่างๆ.....	102
ตารางที่ 5.9 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐานด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	106
ตารางที่ 5.10 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐานด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยกรด H ₂ SO ₄ ความเข้มข้นต่างๆ.....	111
ตารางที่ 5.11 ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ผ่านมาตรฐานด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ.....	119
ตารางที่ 5.12 สรุปค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในการบำบัดน้ำเสียด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออนและ ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	128

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า.....	5
รูปที่ 3.2 ผลของคิเลติงลิแกนด์ที่มีผลต่อค่าคงที่สมดุล.....	11
รูปที่ 3.3 แสดงการกระจายของ Species ของสารละลายที่มี [Cu ²⁺] = [EDTA] = 0.01M ที่ 298 K และ Ionic Strength = 0.....	13
รูปที่ 3.4 pH and Eh Field of Stability of Iron.....	18
รูปที่ 3.5 รูปตัดชั้นพื้นผิวออกไซด์โลหะ.....	20
รูปที่ 3.6 ปฏิกิริยาการจับคู่ (Coordination) บนผิวสัมผัสของออกไซด์และน้ำ.....	24
รูปที่ 3.7 โครงร่างของเรซิน.....	26
รูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นถึงความคล้ายคลึงระหว่างคิเลติงเรซินกับสารเชิงซ้อนEDTA.....	30
รูปที่ 3.9 การแพร่ของไอออนผ่านชั้นฟิล์มและภายในเม็ดเรซิน.....	33
รูปที่ 3.10 แสดงกราฟค่าความเข้มข้นกับปริมาตรน้ำเสียจุดต่างๆ ในการแลกเปลี่ยนไอออน.....	36
รูปที่ 3.11 แสดงกราฟชนิดต่างๆของค่าอัตราส่วนความเข้มข้นที่เข้าและออก จากคอลัมน์เรซิน.....	37
รูปที่ 3.12 ลักษณะของถังแลกเปลี่ยนไอออนโดยทั่วไป.....	38
รูปที่ 3.13 ความลึกของชั้นเรซินที่มีผลต่ออำนาจการแลกเปลี่ยนไอออน.....	41
รูปที่ 3.14 อัตราไหลที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออน.....	42
รูปที่ 4.1ก. แผนการวิจัยการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงเชิงซ้อน.....	53
รูปที่ 4.1ข. แผนการวิจัยการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง.....	54
รูปที่ 4.2 เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดต่างแ่.....	56
รูปที่ 4.3 ทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์.....	58
รูปที่ 4.4 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	59
รูปที่ 4.5 คอลัมน์และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	60
รูปที่ 4.6 แผนภาพแสดงขอบเขตการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัด ทองแดงเชิงซ้อนด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	62
รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงขอบเขตการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัด ทองแดงเชิงซ้อนด้วยทราเยเคลือบเหล็กออกไซด์.....	64

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.8 แผนภาพแสดงขอบเขตการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัด ทองแดงด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์.....	65
รูปที่ 4.9 แผนภาพแสดงการดำเนินการทดลองส่วนที่ 1.....	67
รูปที่ 4.10 แผนภาพแสดงการดำเนินการทดลองส่วนที่ 2.....	69
รูปที่ 4.11 แผนภาพแสดงการดำเนินการทดลองส่วนที่ 3.....	72
รูปที่ 5.1 ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	83
รูปที่ 5.2 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน.....	83
รูปที่ 5.3ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วย NaOH ความเข้มข้น 3%.....	85
รูปที่ 5.3ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วย NaOH ความเข้มข้น 4%.....	85
รูปที่ 5.3ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วย NaOH ความเข้มข้น 5%.....	86
รูปที่ 5.3ง. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วย NaOH ความเข้มข้น 6%.....	86
รูปที่ 5.4ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 3%.....	88
รูปที่ 5.4ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 4%.....	88
รูปที่ 5.4ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 5%.....	89
รูปที่ 5.4ง. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 6%.....	89
รูปที่ 5.5 เปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยน ไอออนที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้นต่างๆ.....	90
รูปที่ 5.6 สัดส่วนของทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณ NaOH ที่ใช้ กับเปอร์เซ็นต์การนำกลับ ทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่หมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้นต่างๆ.....	90

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.7 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนทั้งหมดสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้นต่างๆ.....	91
รูปที่ 5.8ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 3 BV/hr.....	93
รูปที่ 5.8ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr.....	93
รูปที่ 5.8ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 6 BV/hr.....	94
รูปที่ 5.9ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ทั้งหมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 3 BV/hr.....	95
รูปที่ 5.9ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ทั้งหมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr.....	95
รูปที่ 5.9ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ทั้งหมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 6 BV/hr.....	96
รูปที่ 5.10 เปอร์เซนต์การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยน ไอออนทั้งหมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ.....	96
รูปที่ 5.11 สัดส่วนของทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณ NaOH ที่ใช้ กับเปอร์เซนต์การนำกลับ ทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนทั้งหมดสภาพด้วย อัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ.....	97
รูปที่ 5.12 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันเรซินแลกเปลี่ยนไอออนทั้งหมดสภาพด้วย อัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ.....	99
รูปที่ 5.13 ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วย อัตราไหลต่างๆ.....	102
รูปที่ 5.14 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วยอัตราไหลต่างๆ...	103
รูปที่ 5.15 ค่าสภาพนำไฟฟ้าในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ด้วย อัตราไหลต่างๆ.....	105
รูปที่ 5.16 ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่างๆ.....	105

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.17 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ค่าพีเอช เริ่มต้นต่างๆ.....	108
รูปที่ 5.18 ค่าสภาพนำไฟฟ้าในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ค่าพีเอช เริ่มต้นต่างๆ.....	108
รูปที่ 5.19ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.1 N.....	110
รูปที่ 5.19ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.01 N.....	110
รูปที่ 5.19ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.001 N.....	111
รูปที่ 5.20ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.1 N.....	112
รูปที่ 5.20ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.01 N.....	112
รูปที่ 5.20ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้น 0.001 N.....	113
รูปที่ 5.21 เปรอ์เซ็นต์การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบ เหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้นต่างๆ.....	113
รูปที่ 5.22 สัดส่วนของทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณกรด H_2SO_4 ที่ใช้ กับเปอร์เซ็นต์ การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้นต่างๆ.....	115
รูปที่ 5.23 ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ที่หมดสภาพด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้นต่างๆ.....	115
รูปที่ 5.24 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่หมดสภาพ ด้วยกรด H_2SO_4 ความเข้มข้นต่างๆ.....	116
รูปที่ 5.25ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 3 BV/hr.....	118

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.25ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr.....	118
รูปที่ 5.25ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ก่อนการรีเจนเนอเรชันด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 6 BV/hr.....	119
รูปที่ 5.26ก. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ทั้งหมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 3 BV/hr.....	120
รูปที่ 5.26ข. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ทั้งหมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 4.5 BV/hr.....	120
รูปที่ 5.26ค. ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ทั้งหมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชัน 6 BV/hr.....	121
รูปที่ 5.27 เเปอร์เซ็นต์การนำกลับทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ทั้งหมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ.....	121
รูปที่ 5.28 สัดส่วนของทองแดงที่นำกลับได้ต่อปริมาณกรด H_2SO_4 ที่ใช้กับเปอร์เซ็นต์การนำกลับ ทองแดงในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งหมดสภาพด้วย อัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ.....	122
รูปที่ 5.29 ความเข้มข้นของเหล็กในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ที่ หมดสภาพด้วยอัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ.....	122
รูปที่ 5.30 ค่าพีเอชในน้ำที่ผ่านการรีเจนเนอเรชันทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ทั้งหมดสภาพด้วย อัตราการรีเจนเนอเรชันต่างๆ.....	123
รูปที่ 5.31 การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบำบัดน้ำเสียจากการผลิตแผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า.....	131

คำจำกัดความและอักษรย่อ

BV	bed volume ปริมาตรชั้นตัวกลางทรายหรือเรซิน หน่วยปริมาตรสารละลายที่ผ่านชั้นตัวกลางเทียบเท่ากับปริมาตรตัวกลาง
BV/hr	bed volume per hour
pH	พีเอช
mg	มิลลิกรัม
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/l.resin	มิลลิกรัมต่อลิตรเรซิน
EDTA	Ethylenediaminetetracetic acid
IOCS	Iron Oxide - Coated Sand ทรายเคลือบเหล็กออกไซด์